干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

新疆典型淡水湖和咸水湖芦苇湿地土壤 CO_2、CH_4和 N_2O 排放研究

王顺科[1,2]，李艳红[1,2]，李发东[1,2,3,4]，王金龙[1,2]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；2. 新疆维吾尔自治区重点实验室“新疆干旱区湖泊环境与资源实验室”，新疆 乌鲁木齐 830054；3. 中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101；4. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100190）

摘 要：为研究新疆典型淡水湖和咸水湖芦苇湿地土壤温室气体排放差异，以中国第一大内陆淡水湖博斯腾湖和新疆第一大咸水湖艾比湖为研究对象，采用静态箱-气相色谱法，利用2016年12月至2017年11月所监测的数据进行对比分析。结果表明：(1)通过分析观测期内日排放均值发现，淡水湖 CO_2排放趋势呈单峰曲线、相邻时间点 CH_4排放趋势不明显，CO_2、CH_4排放均值曲线均高于咸水湖。淡水湖和咸水湖 N_2O 分别在9:00—13:00，17:00—21:00排放差异不明显，排放峰值分别出现在17:00和13:00。(2)淡水湖和咸水湖芦苇湿地土壤 CO_2、CH_4、N_2O 季节变化均呈单峰曲线趋势，温室气体排放峰值主要集中在夏季，咸水湖 N_2O 排放峰值出现在秋季，淡水湖和咸水湖 CO_2、N_2O 排放量差异性不显著($P>0.05$)，两湖 CH_4排放量差异性显著($P<0.05$)。(3)湖泊湿地在冬季储存大量温室气体，博斯腾湖 CO_2、CH_4和 N_2O 在春季融解的排放量占全年总累计排放量的22%、30%和12%，艾比湖占40%、0.8%和47%。(4)土壤温度、土壤含水量和土壤有机质对艾比湖 CO_2排放量的促进作用较弱。pH对博斯腾湖 N_2O 排放起到抑制作用，土壤盐分对艾比湖 CO_2和博斯腾湖 CH_4排放的抑制作用较强。(5)干旱区湖泊芦苇湿地土壤全球增温潜势表现为：淡水湖 > 咸水湖，淡水湖和咸水湖芦苇湿地在百年尺度上对全球变暖均有促进作用。

关键词：博斯腾湖；艾比湖；温室气体；冻融；全球增温潜势

有研究表明 CO_2、CH_4和 N_2O 在温室气体中占比分别为60%、15%和5%[1]。干旱区湖泊湿地对温室效应的贡献较大，芦苇是湿地生态系统与外界大气传输的重要媒介[2]。因此，研究干旱区淡水湖和咸水湖芦苇湿地温室气体排放，对有效准确控制湖泊湿地温室气体排放有重要意义。国内外学者对干旱区淡水湖和咸水湖芦苇湿地温室气体进行了多方面的研究，通过研究博斯腾湖北岸芦苇湿地土壤呼吸时发现，在4、7月和10月，芦苇群落土壤呼吸日变化表现为单峰、双峰、单峰型曲线，峰值出现的时间均在12:00—16:00，均与近地面温度和土壤温度呈显著相关[3]；通过密闭静态箱-气相色谱法研究天鹅湖高寒湿地表明，6月 CH_4排放出现峰值，出现在11:00左右[4]。通过研究，艾比湖流域土壤呼吸发现水分(以土壤水分或大气湿度的形式)是影响冬季土壤呼吸速率变化的主要因素[5]；通过研究，博斯腾湖芦苇湿地土壤温室气体排放表明，博斯腾湖芦苇湿地土壤是 CO_2、CH_4和 N_2O 的“源”[6]。目前，国内外学者对干旱区湖泊湿地温室气体排放的研究，一般都是利用静态箱-气相色谱法，只研究淡水湖或咸水湖芦苇湿地温室气体在春、夏、秋季及其对应的日变化特征。对淡水湖和咸水湖芦苇湿地温室气体在冻融过程中及其日变化排放特征研究较少。有研究表明，非生长季冻融排放过程是大气温室气体的热点排放源。博斯腾湖和艾比湖作为新疆典型的淡水湖和咸水湖，处于高纬度地区，冬季漫长且昼夜温差大。通过分析两湖芦苇湿地土壤温室气体在生长期和冻融过程中的排放特征与影响因素，为我国干旱区湖泊芦苇湿地土壤温室气体排放提供原始数据积累。

收稿日期：2020-06-16； **修订日期：**2020-7-17
基金项目：国家自然科学基金项目(41561104)资助
作者简介：王顺科(1997-)，男，主要研究方向为干旱区湖泊湿地温室气体排放. E-mail: 1072013489@qq.com
通讯作者：李艳红. E-mail: lyh0704@126.com

1 研究区概况

以新疆淡水湖和咸水湖作为研究区,选择了典型的博斯腾湖和艾比湖(图1)。博斯腾湖位于新疆巴音郭愣蒙古自治州博湖县(41°45′~42°15′N,86°12′~87°26′E),艾比湖位于新疆博尔塔拉蒙古自治州精河县(44°43′~45°12′N,82°35′~83°11′E)。博斯腾湖水域面积1002 km^2[7],是全国最大的内陆淡水吞吐湖。湖区年均降水量与蒸发量约为1:29,属中温带干旱荒漠气候,日照时数约为3074 h。博斯腾湖土壤以腐殖质沼泽土、泥炭土和盐化泥炭土为主[8],且有深厚的淤泥沉积在湖床上,形成了优良的芦苇生长环境。开都河是目前唯一能常年注入博斯腾湖的河流。艾比湖水域面积500 km^{2}左右[9],是新疆最大的咸水湖。区域内西、南、北三面环山,西北的阿拉山口是著名的大风口,湖区降水稀少,多年平均降水量与蒸发量约为1:15,属温带大陆性干旱气候,日照时数约2800 h。艾比湖地区地带性土壤为灰漠土、灰粽漠土和风沙土,非地带性土壤为盐土、草甸土和沼泽土。精河、博尔塔拉河、奎屯河、阿奇克苏河是注入艾比湖的4个主要河流。

2 研究方法

2.1 研究区的选取

对博斯腾湖、艾比湖湖滨芦苇湿地进行土壤气体采集,环湖一周均匀选取了5个样地,博斯腾湖:育苇公司、金沙滩、银沙滩、金海湾和扬水站;艾比湖:石头房子、桑德库木、鸭子湾、北地和乌岛。在每个采样地上设置一个50 m×50 m的大样方,分别在每个大样方里设置3个10 m×10 m小样方。

2.2 气体的采集及分析

利用静态箱-气相色谱法采集和分析干旱区湖泊芦苇湿地土壤CO_2、CH_4和N_2O。静态箱体由内径22 cm、高19.5 cm的圆柱形PVC管制成[6]。本次研究从2016年12月至2017年11月,每个季节选择气象要素相对稳定的1 d进行气体样品采集,采气时两湖10个点同时开始采集,每次采气设置4次重复采样。采集气体样品时,将静态箱安置在其基座凹槽中,为保证其密封,抽气取样时,将水封槽内注满水,然后将气密室密封罩罩上[10]。采气时间为:9:00、13:00、17:00、21:00,采气开始后,每5 min采集1次,共计4次。采集30 mL气体并注入真空玻璃容器中,利用气相色谱法在中国科学院禹城综合试验站进行测定。

2.3 土壤采集

采集气体时,在每个小样方内芦苇分布均匀的区域建立3个0~60 cm的土壤剖面,分为0~10、10~20、20~40、40~60 cm土层,利用容积为100 cm^{3}钢制环刀切割每层自然状态下的土壤,并将其土壤装入信封袋并带回实验室,在室内自然通风状态下风干、研磨、过筛之后,测定其土壤理化性质。利用电位法测定土壤pH,用烘干法测定土壤含水量,土壤有机质采用油浴加热重铬酸钾氧化容量法测定[11],土壤盐分采用重量法。每次采集气体和土壤时,并用仪器测量相对应的土壤温度、近地面温度。

2.4 数据处理及分析

2.4.1 数据处理 温室气体排放量计算公式:

$$F=\frac{\left(\frac{1-BD}{2.65}-Wc\times BD\right)^{8}\times\sum_{n=1}^{3}\frac{C_{n+1}-C_{1}}{5n}}{3\times\left(\frac{1-BD}{2.65}\right)^{2}}$$

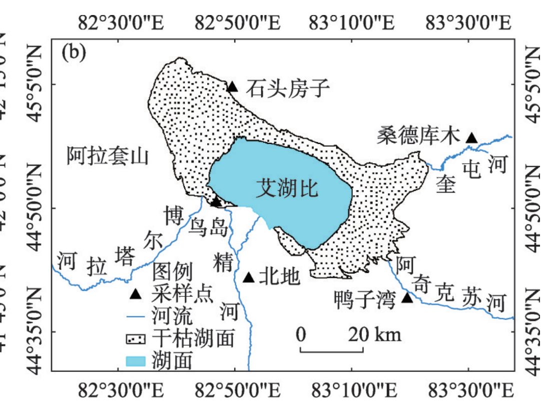


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

式中:F为CO_2(mg·m^{-2}·h^{-1})、CH_4(μg·m^{-2}·h^{-1})和N_2O(μg·m^{-2}·h^{-1})的排放量;Wc为土壤含水量(mL·cm^{-3});BD为土壤容重(mg·cm^{-3});$C_{n+1}-C_1$表示n个5 min内的气体浓度差(mol·mL^{-1})。

温室气体年度累计排放量[12]:

$$CE=\sum_{i=1}^{n}\frac{F_{i+1}-F_i}{2}\times(t_{i+1}-t_i)\times 24$$

式中:CE表示(CO_2、CH_4、N_2O)的累计排放量;F为温室气体排放量;i表示第i次气体采样;$t_{i+1}-t_i$表示2个相邻测定的间隔,d;n为通量观测次数。

全球增温潜势计算公式[13]:

$$GWP=CE_{CO_2}+CE_{CH_4}\times 25+CE_{N_2O}\times 298$$

2.4.2 数据分析 采用SPSS 25.0进行相关分析、一次函数回归模型分析和t检验。利用Origin 8.5、ArcGIS 10.0进行绘图。

3 温室气体的排放特征

3.1 CO_2排放特征

在图2a中,由全年日排放量(SA)变化趋势可知,博斯腾湖CO_2日排放量13:00后逐渐下降,艾比湖CO_2均值在9:00、13:00为排放峰值,21:00为弱排放,博斯腾湖全年CO_2日排放量表现为:13:00>17:00>9:00>21:00,艾比湖:17:00>9:00>13:00>21:00。春季博斯腾湖和艾比湖的排放趋势相反,秋季类同;夏季两湖的CO_2排放差量逐渐减小;冬季博斯腾湖CO_2在9:00—17:00变化量小于1.9 mg·m^{-2}·h^{-1},艾比湖在9:00—17:00 CO_2吸收量逐渐增大。博斯腾湖CO_2排放量在9:00、13:00、17:00之间的无显著差异(P>0.05),均与21:00 CO_2排放量差异显著(P<0.05),艾比湖类同。

在图2b中,两湖芦苇湿地土壤CO_2季节排放趋势均为单峰曲线,夏季均有较高的CO_2排放量。博斯腾湖CO_2排放量表现为:夏季>春季>秋季>冬季>0;夏季与春秋、冬季排放差异性均显著(P<0.05)。冬季艾比湖CO_2排放量为负值,表现为:夏季>秋季>春季>冬季,春、秋季艾比湖CO_2的排放量无显著差异(P>0.05),夏、冬季差异显著(P<0.05)。博斯腾湖与艾比湖芦苇湿地土壤CO_2排放量的变化范围分别为2.71~142.58 mg·m^{-2}·h^{-1}、−11.26~61.68 mg·m^{-2}·h^{-1},春季消融期间两湖CO_2排放量分别为30.95 mg·m^{-2}·h^{-1}、29.07 mg·m^{-2}·h^{-1},占全年累计排放量的22%、40%。在全年变化范围内博斯腾湖(47.75 mg·m^{-2}·h^{-1})>艾比湖(20.55 mg·m^{-2}·h^{-1})。博斯腾湖与艾比湖芦苇湿地土壤CO_2排放量间差异不显著(P>0.05)。

3.2 CH_4排放特征

在图3a中,由全年日排放量(SA)变化趋势可知,博斯腾湖CH_4在9:00、13:00、17:00排放差异不明显;艾比湖CH_4在9:00、17:00、21:00为弱排放;博斯腾湖CH_4排放量表现为:9:00>17:00>13:00>21:00,艾比湖:13:00>21:00>17:00>9:00。春季博斯腾湖CH_4在13:00达到最低值;艾比湖CH_4排放量在春、冬季呈减少趋势。夏季两湖CH_4排放趋势相反,均呈"脉冲式"型,秋季类同。冬季博斯腾湖CH_4日变化幅度较小,21:00为负值。博斯腾湖CH_4排放量在9:00、13:00无显著差异(P>0.05),均与17:00、21:00差异显著(P<0.05),艾比湖的CH_4排放量均与9:00、17:00、21:00差异显著(P<0.05)。

在图3b中,两湖CH_4季节排放量呈单峰曲线。博斯腾湖在春、夏、秋季有较高的CH_4排放量,表现为:夏季>秋季>春季>冬季>0,夏、秋季CH_4排放量

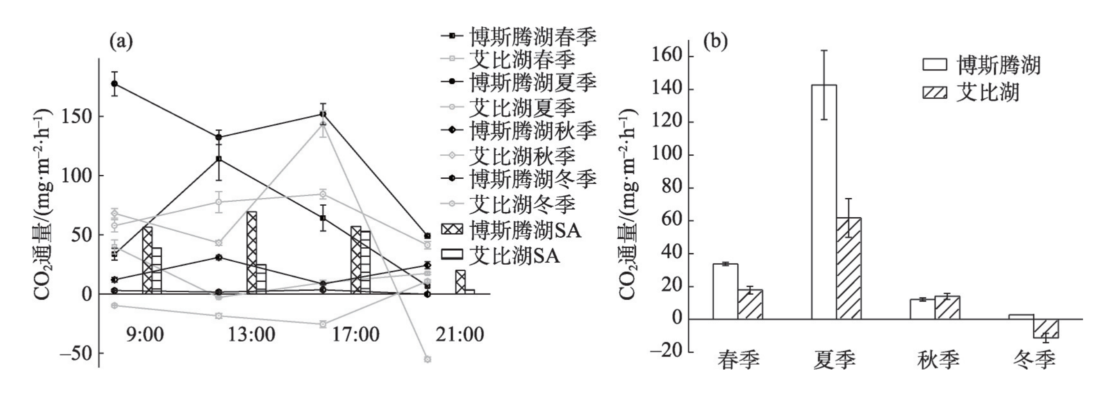


图2 博斯腾湖和艾比湖芦苇湿地土壤CO_2日排放及季节排放

Fig. 2 Daily and seasonal CO_2 emissions characteristics of reed wetland soil in Bosten Lake and Ebinur Lake

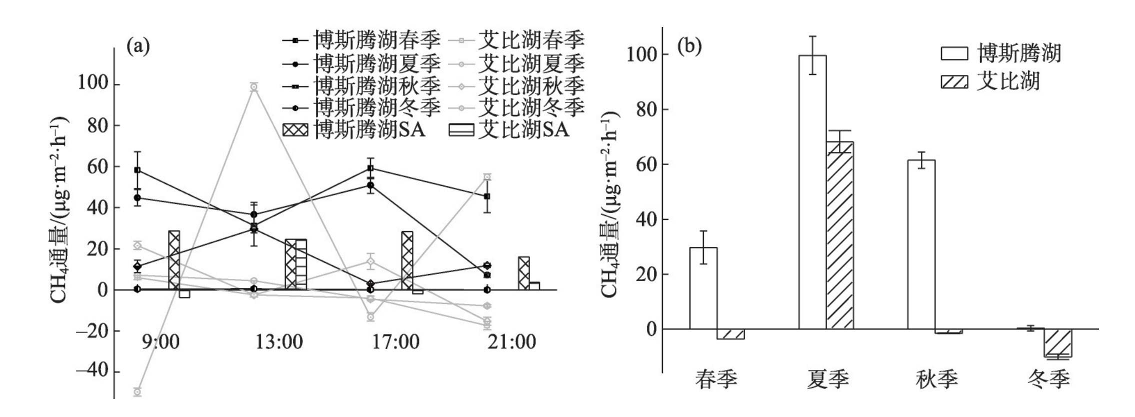


图3 博斯腾湖和艾比湖芦苇湿地土壤CH_4日排放及季节排放

Fig. 3 Daily and seasonal CH_4 emissions characteristics of reed wetland soil in Bosten Lake and Ebinur Lake

无显著差异(P>0.05),但夏季与春、冬季差异显著(P<0.05)。艾比湖CH_4在夏季排放,其余季节均为CH_4弱吸收,表现为:夏季>秋季>春季>冬季,夏季与春秋冬季排放量差异显著(P<0.05)。博斯腾湖和艾比湖芦苇湿地土壤CH_4排放量的变化范围分别为:9.12~69.57 μg·m^{-2}·h^{-1}、−0.62~25.43 μg·m^{-2}·h^{-1},春季消融期间两湖CH_4排放量分别为29.34 μg·m^{-2}·h^{-1}、6.46 μg·m^{-2}·h^{-1},占全年的30%、0.8%。在全年变化范围内表现为博斯腾湖(47.80 μg·m^{-2}·h^{-1})>艾比湖(13.23 μg·m^{-2}·h^{-1})。博斯腾湖与和艾比湖芦苇湿地土壤CH_4排放量间差异性显著(P<0.05)。

3.3 N_2O排放特征

在图4a中,由全年日排放量(SA)变化趋势可知,博斯腾湖N_2O日排放量21:00排放量趋于0,艾比湖N_2O与CH_4变化趋势类同,博斯腾湖N_2O排放量表现为:17:00>13:00>9:00>21:00,艾比湖:13:00>21:00>9:00>17:00。春季博斯腾湖和艾比湖分别在17:00、13:00达到峰值。夏季在17:00两湖N_2O排放差值最大(61.18 μg·m^{-2}·h^{-1})。秋季博斯腾湖、艾比湖N_2O变化幅度均较小。冬季博斯腾湖N_2O在17:00—21:00的变化量最大(67.7 μg·m^{-2}·h^{-1});艾比湖N_2O在9:00和17:00均为负值。博斯腾湖17:00排放量均与9:00、13:00、21:00排放量差异显著(P<0.05),艾比湖13:00的N_2O排放量与9:00、17:00差异显著(P<0.05)。

在图4b中,博斯腾湖和艾比湖N_2O季节排放量均呈单峰曲线。博斯腾湖秋季有较高的N_2O排放;排放量表现为:秋季>夏季>春季>冬季,N_2O排放量在春夏季之间无显著差异(P>0.05),但秋季与秋季差异显著(P<0.05)。艾比湖N_2O在春夏季有较高的排放,冬季为N_2O吸收汇,表现为:夏季>春季>秋季>冬季,春秋冬季N_2O排放量无显著差异(P>0.05),但都与夏季差异显著(P<0.05)。博斯腾湖和艾比湖芦苇湿地土壤N_2O的变化范围分别为:1.39~65.57 μg·m^{-2}·h^{-1}、−0.62~52.43 μg·m^{-2}·h^{-1},春季消融期间两湖N_2O排放量本别为7.61 μg·m^{-2}·h^{-1}、

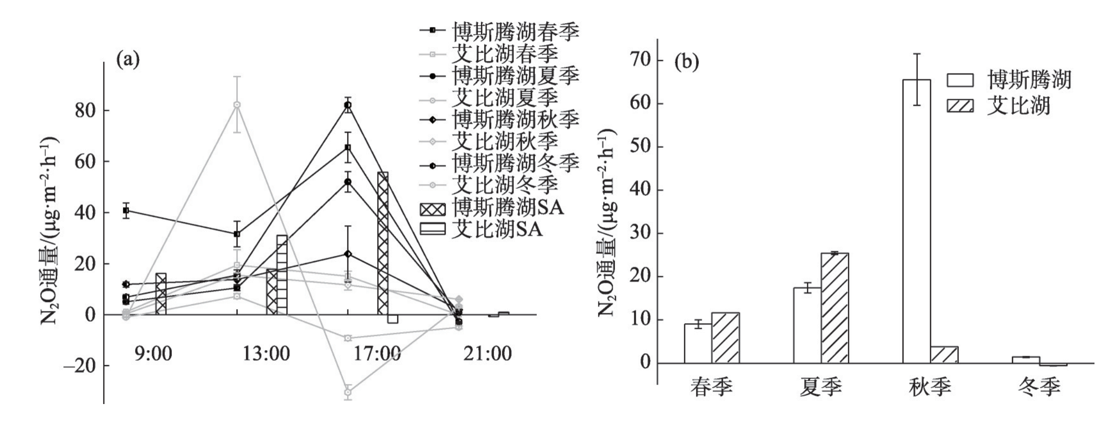


图4 博斯腾湖和艾比湖芦苇湿地土壤N_2O日排放及季节排放

Fig. 4 Daily and seasonal N_2O emissions characteristics of reed wetland soil in Bosten Lake and Ebinur Lake

12.3 μg·m^{-2}·h^{-1}，分别占全年累积排放量的12%、47%。在全年变化范围内表现为博斯腾湖（22.34 μg·m^{-2}·h^{-1}）>艾比湖（10.07 μg·m^{-2}·h^{-1}）。博斯腾湖与和艾比湖芦苇湿地平均N_2O排放量间差异不显著（P>0.05）。

4 温室气体的排放量与影响因子的相关与回归分析

4.1 CO_2与影响因子的相关与回归分析

由表1可知，博斯腾湖土壤CO_2排放量与土壤温度、土壤含水量呈极显著正相关，相关系数分别为0.50和0.37；与近地表温度呈显著性负相关，相关系数为−0.27；博斯腾湖和艾比湖土壤CO_2排放量与pH均呈显著性正相关，相关系数分别为0.19和0.16；艾比湖土壤CO_2排放量与土壤盐分相关性显著，相关系数为−0.21。土壤温度、近地表温度、土壤含水量和pH分别能解释博斯腾湖土壤CO_2排放量的22.8%、11.2%、14.3%和10.4%，可知，博斯腾湖CO_2受到土壤温度的影响较大。pH和土壤盐分分别能够解释艾比湖土壤CO_2排放量的35.1%和45.2%，说明土壤盐分对艾比湖CO_2排放量的影响最大，其次为pH。

4.2 CH_4与影响因子的相关与回归分析

由表2可知，博斯腾湖和艾比湖土壤CH_4排放量与土壤温度均呈显著正相关，相关系数分别为0.24、0.28，与土壤盐分呈显著负相关，相关系数分别为−0.15、−0.35；博斯腾湖土壤CH_4排放量与土壤含水量呈显著正相关；艾比湖土壤CH_4排放量与有机质呈极显著相关，相关系数为0.21。土壤温度、土壤含水量分别能够解释博斯腾湖CH_4排放量的15.2%、14.4%，可知对博斯腾湖土壤CH_4排放量的贡献量最大的是土壤温度。土壤含水量、土壤盐分和有机质分别能够解释艾比湖土壤CH_4排放量的

表1 干旱区湖泊芦苇湿地土壤CO_2排放量与影响因子相关回归分析

Tab. 1 Correlation regression analysis of CO_2 emission fluxes and influencing factors of lake reed wetland in arid area

	参数	Ts	T_{air}	Wc	pH	Ss	Os
相关分析	博斯腾湖	0.50**	−0.27*	0.37**	0.19*	−0.13	0.12
	艾比湖	0.11	0.12	−0.10	0.16*	−0.21*	0.08
	参数	影响因子	回归方程			R^2	Sig
回归分析	博斯腾湖	Ts	$F_{CO_2}=6.156Ts+326.448$			0.228	0.002
		T_{air}	$F_{CO_2}=-13.303T_{air}+943.238$			0.112	0.026
		Wc	$F_{CO_2}=850.213Wc+555.93$			0.143	0.000
		pH	$F_{CO_2}=54.968pH+114.138$			0.104	0.030
	艾比湖	pH	$F_{CO_2}=4.451pH+8.686$			0.351	0.021
		Ss	$F_{CO_2}=0.258Ss+51.097$			0.452	0.002

注：**表示极显著相关（P<0.01），*表示显著相关（P<0.05）；Ts表示土壤温度；T_{air}表示近地表温度；Wc表示土壤含水量；Ss表示土壤盐分；Os表示土壤有机质。下同。

表2 干旱区湖泊芦苇湿地土壤CH_4排放量与影响因子相关回归分析

Tab. 2 Correlation regression analysis of CH_4 emission fluxes and influencing factors of lake reed wetland in arid area

	参数	Ts	T_{air}	Wc	pH	Ss	Os
相关分析	博斯腾湖	0.24*	0.23	0.19*	0.17	−0.15*	0.12
	艾比湖	0.28*	0.05	0.03	−0.03	−0.35**	0.21**
	参数	影响因子	回归方程			R^2	Sig
回归分析	博斯腾湖	Ts	$F_{CH_4}=0.118Ts-0.317$			0.152	0.004
		Wc	$F_{CH_4}=3.827Wc+2.878$			0.144	0.035
		Ss	$F_{CH_4}=-0.172Ss+3.655$			0.409	0.000
	艾比湖	Ts	$F_{CH_4}=0.006Ts+1.865$			0.192	0.004
		Ss	$F_{CH_4}=-0.427Ss+2.359$			0.151	0.004
		Os	$F_{CH_4}=0.007Os+2.221$			0.091	0.011

19.2%、15.1%和9.1%，说明土壤含水量对艾比湖CH_4排放量的贡献最大，其次为土壤盐分。

4.3 N_2O与影响因子的相关与回归分析

由表3可知，博斯腾湖土壤N_2O排放量与土壤含水量和pH相关性极显著，相关系数分别为0.51、−055；艾比湖与土壤温度、土壤含水量和有机质均呈显著相关，相关系数分别为0.25、0.31、0.42。土壤含水量、pH能够解释博斯腾湖土壤N_2O排放量的25.2%、29.2%，可知土壤含水量对博斯腾湖土壤N_2O排放量的贡献最大，其次为pH。土壤含水量、有机质分别解释艾比湖土壤N_2O排放量的15.1%、31.5%，因此，土壤含水量对艾比湖土壤N_2O排放量的贡献量较大，其次为有机质。

5 博斯腾湖、艾比湖芦苇湿地温室气体累积排放总量及全球增温潜势

全球增温潜势(GWP)是目前衡量温室气体增温能力的一个通用指标，GWP是100 a的时间框架内，各种温室气体的温室效应对应于相同效应的二氧化碳的质量。由表4可知，博斯腾湖和艾比湖芦苇湿地土壤全球增温潜势表现为：博斯腾湖芦苇湿地大于艾比湖芦苇湿地。两湖芦苇湿地在百年尺度上对全球变暖均有促进作用，淡水湖湿地的促进作用较大。

6 讨 论

6.1 干旱区典型淡水湖、咸水湖芦苇湿地土壤CO_2排放差异

土壤CO_2最主要由植物根系呼吸和土壤微生物异氧呼吸产生[14]，研究表明，土壤中有机质的数量及矿化速率、土壤微生物类群的数量及其活性、土壤动植物的呼吸作用等是土壤CO_2排放的决定性因素[15]。淡水湖芦苇湿地土壤CO_2的日排放均值曲线高于咸水湖，在13:00排放差量最大；满中龙[16]研究表明，气温为艾比湖湿地土壤呼吸作用的主要影响因子，相关性分析表明，近地表温度与艾比湖CO_2排放量呈负相关，因而艾比湖CO_2排放量在13:00降低的主要原因可能是空气温度抑制了排放量。淡水湖CO_2季节排放量大于咸水湖，排放趋势均为单峰曲线；盐胁迫影响正常呼吸代谢的同时也影响到植物的光合代谢，造成一系列不良的连锁反应，使植物呼吸强度首先增强，后随着时间的延长而减弱[17]，土壤盐分与艾比湖CO_2排放量呈负相关，造成艾比湖排放量低的主要原因是土壤盐分含量高。淡水湖和咸水湖秋季到春季冻融期间CO_2排放量分别为30.95 $mg·m^{-2}·h^{-1}$、29.07 $mg·m^{-2}·h^{-1}$，占全年累计排放量的22%、40%。温差所导致的冻融交替会增加CO_2排放所需的碳源，但有研究表明，CO_2排放量的增加

表3 干旱区湖泊芦苇湿地土壤年N_2O排放量与影响因子相关回归分析

Tab. 3 Correlation regression analysis of N_2O emission fluxes and influencing factors of lake reed wetland in arid area

	参数	Ts	T_{air}	Wc	pH	Ss	Os
相关分析	博斯腾湖	0.07	0.16	0.51**	−0.55**	−0.01	0.07
	艾比湖	0.25*	0.23	0.31*	0.04	−0.11	0.42*

	参数	影响因子	回归方程	R^2	Sig
回归分析	博斯腾湖	Wc	$F_{N_2O}=93.813Wc-0.145$	0.252	0.000
		pH	$F_{N_2O}=-24.278pH+212.141$	0.292	0.000
	艾比湖	Ts	$F_{N_2O}=-24.278pH+212.141$	0.065	0.006
		Wc	$F_{N_2O}=0.278Wc+0.756$	0.151	0.036
		Os	$F_{N_2O}=0.062Os+0.054$	0.315	0.000

表4 博斯腾湖、艾比湖芦苇湿地土壤温室气体累积排放量及全球增温潜势

Tab.4 Cumulative emission fluxes of soil greenhouse gases and global warming potential of reed wetland in Bosten Lake and Ebinur Lake

参数	CO_2/(kg·hm^{-2})	CH_4/(kg·hm^{-2})	N_2O/(kg·hm^{-2})	GWP/(kg·CO_2·hm^{-2})
博斯腾湖	1412.68	0.23	0.07	1439.29
艾比湖	406.06	−0.03	0.04	417.23

幅度随着冻融循环次数的增加逐渐减小[18]，由实验分析可知，淡水湖有机质含量在春季高于咸水湖，因而在冻融期淡水湖 CO_2 排放量高的主要原因可能是春季有机质含量较高，为土壤微生物进行矿化作用提供的大量的底物，进而为土壤呼吸提供充足的碳源。

6.2 干旱区典型淡水湖、咸水湖芦苇湿地土壤 CH_4 排放差异

湿地甲烷排放主要由甲烷的产生、甲烷的氧化和甲烷向大气释放的过程等三部分组成[19]，芦苇湿地在淹水期间，有大量的 CH_4 排放，在排水后，CH_4 排放明显喊少[20]。淡水湖 CH_4 日排放量的变化幅度较小，且两湖 CH_4 排放量在13:00差异较小；由相关分析可知，淡水湖土壤含水量与 CH_4 排放量呈显著正相关，在检测过程中淡水湖芦苇湿地土壤湿度较咸水湖大，因而土壤含水量可能是影响淡水湖 CH_4 排放量大的主要因素。在春秋季淡水湖表现为较高的 CH_4 排放量，咸水湖则为较弱的“汇”；春秋季气温和土壤温度均较低，不利于甲烷的产生和输送过程[21]。芦苇对 CH_4 的传输中对流传输贡献较大，其对 CH_4 排放量的贡献率为54%～87%[22]。土壤表层和中层的水分和盐分是芦苇叶功能性状最主要的驱动力[23]，土壤盐分与艾比湖 CH_4 排放量呈显著负相关，因此，土壤盐分可能是通过影响咸水湖芦苇植被群落的生长发育进而抑制 CH_4 的排放。秋春冻融交替期间淡水湖和咸水湖 CH_4 排放量分别为29.34 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$、6.46 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$，占全年的30%、0.8%。在土壤冻融过程中冻融交替会影响土壤通气状况和氧化还原条件，当土壤冻结时形成的厌氧环境有利于产 CH_4 菌活动，而当土壤解冻后，冻结在土壤中的 CH_4 气体会被释放出来[24]，冬季低温抑制了产甲烷菌的活性，且表层冻结层易形成严格厌氧环境，增加 CH_4 在融解期的产量，因此淡水湖含水量和有机质含量较高，可能是造成 CH_4 含量高于咸水湖的主要原因。

6.3 干旱区典型淡水湖、咸水湖芦苇湿地土壤 N_2O 排放差异

土壤 N_2O 主要通过土壤微生物的硝化和反硝化过程产生[25]，而温度和土壤含水量是硝化作用和反硝化作用产生 N_2O 的主导因素[26-27]。淡水湖 N_2O 排放量在9:00—13:00变化不明显，咸水湖在17:00—21:00类同；土壤含水量是否饱和对 N_2O 排放量的影响程度有明显差异[28]，一般认为，未饱和时土壤 N_2O 的排放量随着土壤含水量的增加而增加，土壤水分过饱和时，极大值出现在中午前后，而水分不饱和时，极大值通常出现在下午。相反，当环境条件不稳定或日较差较小时，N_2O 排放的日变化没有规律性[29]，因此，淡水湖和咸水湖可能在17:00和13:00之后土壤含水量达到饱和。在秋季淡水湖 N_2O 排放量达到峰值，并且与咸水湖相差61.8 $\mu g\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$；咸水湖 N_2O 在秋季排放量降低的原因可能是温度影响了微生物活性，土壤含水量在夏季之后达到了饱和，则影响 N_2O 的主导因素变为温度。淡水湖湿地在秋季之后就达到了饱和或未饱和，导致秋季土壤 N_2O 的排放量与咸水湖存在较大的差异。秋春冻融交替过程中淡水湖和咸水湖 N_2O 排放量分别为7.61 $\mu g\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$、12.3 $\mu g\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$，分别占全年累积排放量的12%、47%。在芦苇湿地土壤冻结期间频繁冻融交替会使土壤形成大量“有氧”、“无氧”或者二者交替的氧化还原环境[30]。有研究表明，冻融交替导致 N_2O 排放量增加的过程中反硝化作用占主导作用[31]，淡水湖 N_2O 排放量低于咸水湖，这可能是在冻融过程中，淡水湖湿地土壤孔隙结构遭到了破坏，没有形成良好的反硝化环境。

7 观测数据时空分布特征及影响评价

由图5可知，博斯腾湖和艾比湖10个采样点的土壤温度和近地表温度排放峰值均在夏季，呈单峰曲线排放形式；夏季到秋季，近地表温度呈线性降低，土壤温度为非线性降低。博斯腾湖采样点的土壤温度在春季和秋季低于艾比湖，冬季相反。北地和鸭子湾的土壤近地表温度相对其他采样点呈春高夏低、变化不明显的特征。育苇公司、金沙滩和金海湾的土壤含水量呈脉冲变化趋势，金海湾的最大值出现在夏季，育苇公司的土壤含水量在春秋季高于其他采样点；其他采样点呈U形变化趋势，桑德库木和银沙滩的最低值出现在秋季，扬水站和艾比湖的其他采样点的最低值出现在夏季。博斯腾湖pH在春-夏-秋-冬之间呈增-增-减的变化，艾比湖pH呈增-减-增变化，艾比湖各采样点的pH最大值出现在冬季；金沙滩和金海湾pH在秋季之后迅速下降，金沙滩最为明显（ΔpH=-1.35），育苇公司pH在秋冬季变化不明显。石头房子和北地土壤盐分含量和全年变化量（北地达到最大：32.33 $g\cdot kg^{-1}$）明

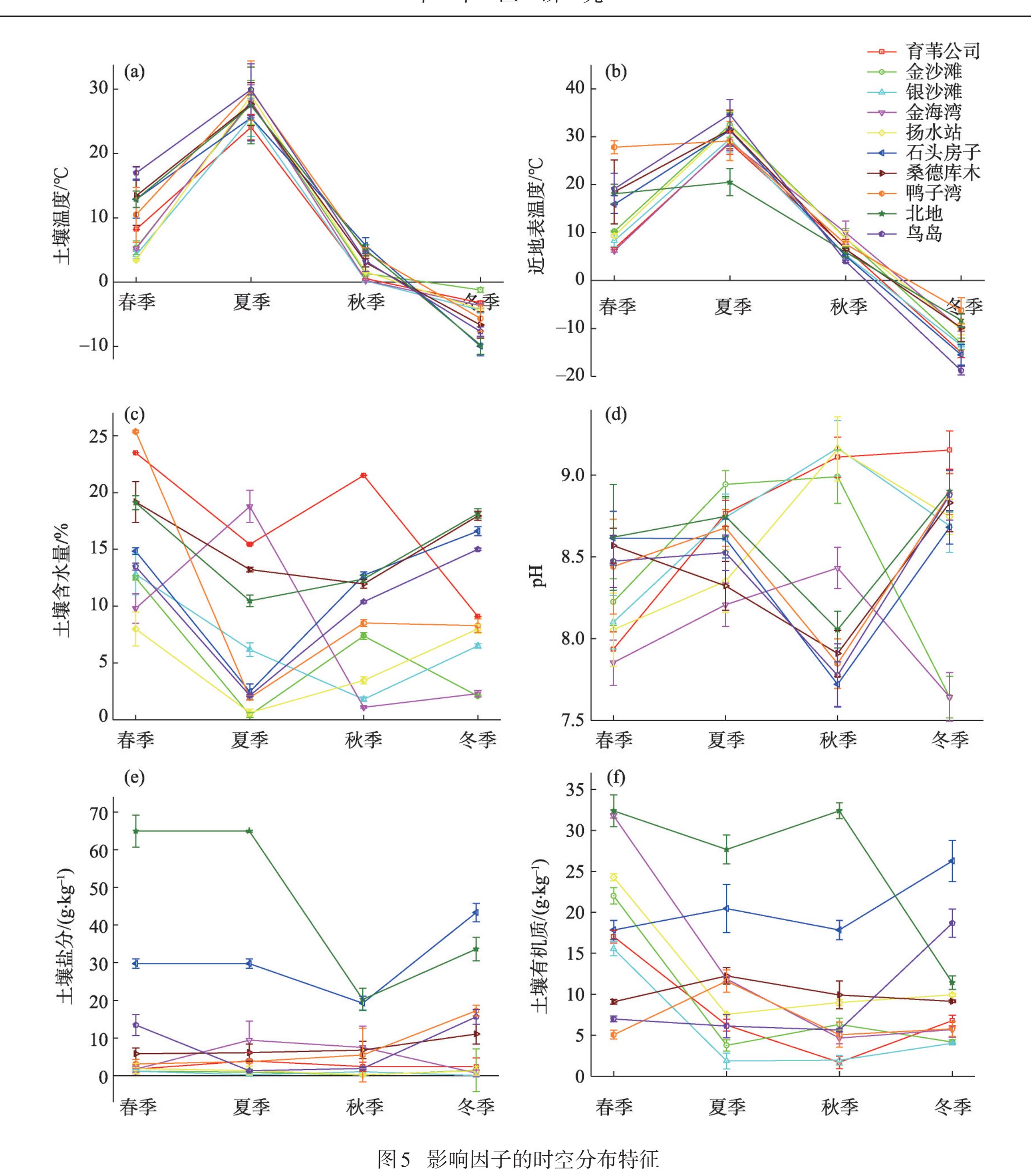


图5 影响因子的时空分布特征

Fig. 5 Temporal and spatial distribution characteristics of influencing factors

显高于两湖其他采样点，两个采样点在春夏季变化不明显，秋季达到最小值；其他采样点全年变化趋势均较小(ΔSs<14.30)。博斯腾湖五个采样点土壤有机质在春夏季降低值明显(ΔSs>10.71 g·kg^{-1})，且，从夏季到冬季变化量不明显；石头房子和北地有机质含量明显高于其他采样点，石头房子有机质变化曲线在鸭子湾之上，均呈脉冲趋势变化。

采样点是通过芦苇分布是否均匀、环湖一周均匀分布等综合因素选取的。对温室气体的直接影响因素为温度，其次为土壤含水量，进而影响土壤理化性质。由图5可知，10个观测点土壤温度，近地表温度并无明显差异，并且两湖10个采样点的海拔差别不大。相对于石头房子和北地而言，土壤盐分和有机质的变化差异较大，这可能与艾比湖退化严重相关。由此说明，采样点海拔高度的差别与其直接影响因素温度对两湖温室气体排放特征研究造成的影响均为间接影响，直接影响因素并无显著差别，对比较两湖的真实性影响较小。

8 结 论

博斯腾湖 CO_2、艾比湖 CH_4、N_2O 日排放过程中13:00排放量较高，博斯腾湖 CH_4、N_2O、艾比湖 CO_2 高

排放量集中在15:00。在全年范围内,博斯腾湖温室气体排放均值均高于艾比湖。湖泊湿地在春季消融过程中,CO_2、CH_4的排放量均为淡水湖较大,N_2O为咸水湖较大。在百年尺度上,全球增温潜势表现为淡水湖>咸水湖,且淡水湖对温室效应的贡献量较大。水热因子对两湖温室气体排放的影响程度不同,但均为关键影响因子。

参考文献(References):

[1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. Science, 1990, 248(4960): 1217-1219.

[2] 胡泓, 王东启, 李杨杰, 等. 崇明东滩芦苇湿地温室气体排放量及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2014, 27(1): 43-50. [Hu Hong, Wang Dongqi, Li Yangjie, et al.Greenhouse gases fluxes at Chongming Dongtan *Phragmites australis* wetland and the influencing factors[J]. Research of Environmental Science, 2014, 27(1): 43-50.]

[3] 马蓉. 新疆博斯腾湖北岸不同地表条件下土壤呼吸特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015. [Ma Rong. Research of Soil Respiration under Different Surface Conditions of the North Shore of Bosten Lake in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2015.]

[4] 杨磊. 巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地CO_2和CH_4排放特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015. [Yang Lei. Research on CO_2 and CH_4 Fluxe in Bayinbuluke Swan Lake Marsh Meadow[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.]

[5] Qin L, Lyu G H, He X M, et al. Winter soil CO_2 efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of Ebinur Lake Area[J]. Eurasian Soil Science, 2015, 48(8): 871-880.

[6] 王金龙, 李艳红, 李发东. 博斯腾湖人工和天然芦苇湿地土壤CO_2、CH_4和N_2O排放量[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 668-677. [Wang Jinlong, Li Yanhong, Li Fadong. Emission fluxes of CO_2, CH_4, and N_2O from artificial and natural reed wetlands in Bosten Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 668-677.]

[7] 钟巍, 舒强. 南疆博斯腾湖近12.0 kaB.P.以来古气候与古水文状况的变化[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(2): 213-219. [Zhong Wei, Shu Qiang. Palaeoclimatic and palaeohydrologic oscillations since about 12 .0 kaB.P.at Bosten Lake, Southern Xinjiang[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2001, 32(2): 213-219.]

[8] 华润葵, 李玉勤. 博斯腾湖芦苇资源调查中遥感技术的应用[J]. 地理科学, 1983, 3(2): 151-158. [Hua Runkui, Li Yuqin. Application of remote sensing technology in investigation of reed resources in Bosten Lake[J]. Scientia Geographica Sinica, 1983, 3(2): 151-158.]

[9] 高建芳, 章曙明, 李新贤. 艾比湖流域水资源可利用量分析[J]. 水文, 2004, 24(5): 32-36. [Gao Jianfang, Zhang Shuming, Li Xinxian. Analysis of water resources availability in the Ebinur basin[J]. Hydrology, 2004, 24(5): 32-36.]

[10] 牛翠云, 王树涛, 郭艳杰, 等. 白洋淀芦苇型水陆交错带湿地CH_4和CO_2的排放特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(15): 209-213. [Niu Cuiyun, Wang Shutao, Guo Yanjie, et al. Emission characteristics of CH_4 and CO_2 in the wetland of reed-type interlaced zone in Baiyangdian[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(15): 209-213.]

[11] 王剑昆, 田明中, 王浩. 内蒙古清水湖老牛湾地质公园环境容量研究[J]. 资源与产业, 2014, 16(3): 37-43. [Wang Jiankun, Tian Mingzhong, Wang Hao. Environmental capacity of Qingshuihe's Laoniuwan Geopark,Inner Mongolia[J]. Resources & Industries, 2014, 16(3): 37-43.]

[12] Cai Y J, Ding W X, Luo J F. Spatial variation of nitrous oxide emission between inteerow soil and interrow plus row in along term maize cultivated sandy loam soils[J]. Geoderma, 2012, 181-182: 2-10.

[13] 孔宪旺, 刘英烈, 熊正琴, 等. 湖南地区不同集约化栽培模式下双季稻稻田CH_4和N_2O的排放规律[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2612-2618. [Kun Xianwang, Liu Yinglie, Xiong Zhengqin, et al. [Sun Xianwang, Liu Yinglie, Xiong Zhengqin, et al. CH_4 and N_2O emissions from double-rice field under different intensified cultivation patterns in Hunan Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(9): 2612-2618.]

[14] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 778-785. [Zhang Dongqiu, Shi Peili, Zhang Xianzhou. Some advance in the main factors controlling soil respiration[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(7): 778-785.]

[15] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 47-52. [Xie Junfei, Li Yu'e. A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2002, 23(4): 47-52.]

[16] 满中龙. 新疆艾比湖湿地土壤CO_2释放规律研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2011. [Man Zhonglong. The Study of Soil CO_2 Release Illustration on Aibi Lake Wetland[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2011.]

[17] 杨晓慧, 蒋卫杰, 魏珉, 等. 植物对盐胁迫的反应及其抗盐机研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2006, 37(2): 302-305. [Yang Xiaohui, Jiang Weijie, Wei Min, et al. Review om plant response and resistance mechanism to salt stress[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2006, 37(2): 302-305.]

[18] 伍星, 沈珍瑶. 冻融作用对土壤温室气体产生与排放的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1432-1439. [Wu Xing, Shen Zhenyao. Effects of freezing-thawing cycle on greenhouse gases production and emission from soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(7): 1432-1439.]

[19] 李楠, 康铁鑫, 安睿, 等. 湿地甲烷排放研究概述[J]. 防护林科技, 2014(9): 86-88. [Li Nan, Kang Tiexin, An Rui, et al. Overview

of research on wetland methane emissions[J]. Protection Forest Science and Technology, 2014(9): 86−88.]

[20] 黄国宏, 肖笃宁, 李玉祥, 等. 芦苇湿地温室气体甲烷(CH_4)排放研究[J]. 生态学报, 2001, 20(9): 1494−1497. [Huang Guohong, Xiao Duning, Li Yuxiang, et al. CH_4 emissions from the reed wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 20(9): 1494−1497.]

[21] 仝川, 曾从盛, 王维奇, 等. 闽江河口芦苇潮汐湿地甲烷通量及主要影响因子[J]. 环境科学学报, 2009, 29(1): 207−216. [Tong Chuan, Zeng Congsheng, Wang Weiqi, et al. Main factors influencing CH_4 flux from a *Phragmites australis* wetland in the Min River estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(1): 207−216.]

[22] 王维奇, 曾从盛, 仝川. 芦苇湿地甲烷排放机理及排放量研究进展[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24(1): 20−25. [Wang Weiqi, Zeng Congsheng, Tong Chuan. Reviews on the mechanism of methane emission and methane flux in reed Marsh[J]. System Sciences and Comprehensive Studies In Agriculture, 2008, 24(1): 20−25.]

[23] 焦亮, 关雪, 刘雪蕊, 等. 内陆河湿地芦苇叶功能性状特征及其对土壤环境因子的响应[J].干旱区研究, 2020, 37(1): 202−211. [Jiao Liang, Guan Xue, Liu Xuerui et al. Functional traits of *Phragmites australis* leaves and response to soil environmental factors in inland river wetland[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 202−211.]

[24] 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等. 季节性冻融期沼泽湿地CO_2、CH_4和N_2O排放动态[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 7−12. [Song Changchun, Wang Yiyong, Wang Yuesi, et al. Dynamics of CO_2, CH_4 and N_2O emission fluxes from mires during freezing and thawing season [J]. Environmental Science, 2005, 26(4): 7−12.]

[25] 张秀君. 土壤N_2O产生的微生物过程[J]. 沈阳教育学院学报, 2005, 7(1): 129−131. [Zhang Xiujun. Microbial processes of nitrous oxide production from soils[J]. Journal of Shenyang College of Education, 2005, 7(1): 129−131.]

[26] Wolf I, Rrssow R. Different pathways of formation of N_2O, N_2 and NO in black erath soil boil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(2): 229−239.

[27] 崔洪磊. 典型滨海湿地植被类型及收割方式对沉积物CO_2和N_2O释放的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2015. [Cui Honglei. Effects of Vegetation Types and Harvesting Methods on Emissions of CO_2 and N_2O in Sediments in a Typical Coastal Wetland[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.]

[28] Rudaz A O, Walti E, Kyburz G, et al. Temporal variation in N_2O and N_2 fluxes from a permanent pasture in Switzerland in relation to management, soil water content and soil temperature[J]. Agriculture Ecosystem & Environment, 1999, 73(1): 83−91.

[29] 李晶, 王明星, 王跃思, 等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 740−749. [Li Jin, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem.[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 740−749.]

[30] Teepe R, Brumme R, Beese F. Nitrous oxide emissions from soil during freezing and thawing periods[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(9): 1269−1275.

[31] Ludwig B, Wolf I, Teepe R. Contribution of nitrification and denitrification to the emission of N_2O in a freeze-thaw event in an agricultural soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004, 167(6): 678−684.

Study on CO_2, CH_4, and N_2O emissions from reed wetlands in typical freshwater lake and saltwater lake in Xinjiang

WANG Shun-ke[1,2], LI Yan-hong[1,2], LI Fa-dong[1,2,3,4], WANG Jin-long[1,2]

(1. *College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal Univeristy, Urumqi* 830054, *Xinjiang, China;* 2. *Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, Urumqi* 830054, *Xinjiang, China;* 3. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China;* 4. *College of Resources and Environment,University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

Abstract: We compare and analyze the monitoring data of Bosten Lake, China's largest inland freshwater lake, and Ebinur, Xinjiang's largest saltwater lake, from December 2016 to November 2017, using static chamber-gas chromatography, researching the difference of soil greenhouse gas emissions between typical freshwater lake and saltwater lake reed wetlands in Xinjiang. It showed that (1) by analyzing the average daily emissions during the observation period, it is found that the CO_2 emission trend of the freshwater lake shows a single peak curve, and the CH_4 emission trends at the adjacent time points are not prominent. The N_2O of freshwater lake and saltwater lake are between 9 o'clock and 13 o'clock, and the differences in emissions between 17:00 and 21:00 were not obvious. (2) The seasonal changes of soil CO_2, CH_4, and N_2O in the freshwater lake and saltwater lake reed wetlands showed a single peak curve trend. The peak of greenhouse gas emissions was mainly concentrated in summer. The peak of saltwater lake N_2O emissions appeared in autumn. There were no significant differences in CO_2 and N_2O emissions between the freshwater lake and the saltwater lake ($P>0.05$), The difference of CH_4 emissions between the two lakes is significant ($P<0.05$). (3) Lake wetlands store large amounts of greenhouse gases in winter. The release of CO_2, CH_4, and N_2O from Bosten Lake in the spring melt accounts for 22%, 30%, and 12% of the total cumulative emissions for the year, and Lake Ebinur accounted for 40%, 0.8%, and 47%. (4) The effects of soil temperature, soil moisture content, and soil organic matter on the CO_2 emissions of the saltwater lake were weak. pH inhibited N_2O emissions from Bosten Lake, and soil salinity had a strong inhibitory effect on CO_2 and CH_4 emissions from Ebinur. (5) The global warming potential of lake reed wetland soil in arid areas was as follows: freshwater lake > saltwater lake. Both the freshwater lake and the saltwater lake reed wetlands contribute to global warming on the centennial scale.

Keywords: Bosten Lake; Ebinur Lake; greenhouse gases; freeze-thaw; global warming potential